

NUEVAS INYECCIONES QUIMICAS ESTRUCTURALES DE BASE SILICATO EN LA INGENIERIA GEOTECNICA

Alvaro López Ruiz
Doctor en Química Industrial (*)

478-6

RESUMEN

Se presentan las propiedades de los suelos granulares estabilizados in situ mediante dos «inyecciones químicas» estructurales, de base silicato sódico, utilizadas por primera vez en la Ingeniería Geotécnica por el autor, y se describen las primeras obras importantes ejecutadas con ellas, en Milán, Barcelona y Madrid. Una de estas soluciones químicas, que produce un gel duro, y que utiliza básicamente como reactivo una mezcla de formamida-acetato de etilo, soluble en el sistema líquido, ha sido tratada ampliamente en el reciente congreso sobre inyecciones, organizado por la ASCE, de Nueva Orleans (Febrero 1982) y se consideran sus resultados en este trabajo. Se describe la utilización para la estabilización de suelos, de otro tipo de solución, también de base silicato, que expansiona durante el proceso de gelificación, y que es compatible con la primeramente indicada, es decir, que se pueden obtener productos con propiedades intermedias. Se pone especial énfasis en la necesidad de un mejor conocimiento de los procesos físico-químicos y reológicos en estos sistemas y de la influencia del factor tiempo sobre su estabilidad y comportamiento intrínsecos y su relación con el medio, que se debieran interpretar a partir de su estructura químico-molecular, de la que dependen también sus propiedades mecánicas.

PREAMBULO

El autor ha trabajado desde hace unos 20 años —en el laboratorio y en obra—, en el campo de las «inyecciones químicas», es decir, de sistemas líquidos en reacción, en la Ingeniería Geotécnica, para la estabilización de suelos

granulares, habiendo aportado innovaciones en este campo, aún en desarrollo, algunas de las cuales se siguen utilizando en obra, en España y en el extranjero.

Este es el caso, hasta donde llega nuestra información, de la inyección química «G-3», de base silicato sódico y reactivo orgánico «formamida-acetato de etilo», en solución acuosa homogénea, de buena permeabilidad en suelos granulares y susceptible de gelificar en un tiempo controlable, dando lugar a un gel duro (1), y el caso de la estabilización de suelos granulares mediante inyecciones expansivas de base silicato (2, 3), que producen, en general, un gel semiduro y de las mezclas de ambos, ya que son compatibles ambos sistemas. Asimismo, es el caso del empleo del «método continuo» de autodosificación y bombeo, al menos en España, para este tipo de inyecciones estructurales y expansivas de base silicato.

El campo más importante de las inyecciones químicas estructurales es el de la estabilización de suelos granulares, especialmente bajo nivel freático, para la construcción de recintos y de túneles, galerías y pozos de acceso, principalmente en las ciudades, y también en minería. El objetivo es doble: (a) facilitar los trabajos de excavación, sellado y construcción, con mayor seguridad y rendimiento, y (b) estabilizar in situ, el suelo granular, aumentando su resistencia y rigidez, disminuyendo los importantes asentamientos, subsidencias, deformaciones y evitar los arrastres, sifonamientos y licuefacciones que se pueden producir en este tipo de obras; estos movimientos pueden afectar también a la integridad de las casas, galerías de servicios y estructuras próximas, para los cuales sirve de recalce la estabilización interna del terreno de apoyo, mediante inyecciones químicas estructurales.

En el reciente congreso internacional «Grouting in Geotechnical Engineering, patrocinado por la ASCE, celebrado en Nueva Orleans, en febrero de 1982, en 6 de los trabajos presentados, 3 de investigación en el laboratorio (4, 5, 6) y 3 de aplicación en obra (7, 8, 9), se ha utilizado básicamente la inyección química G-3. Sin embargo, a pesar de su creciente utilización en obras de ingeniería civil, para la estabilización temporal de suelos granulares con fines estructurales, principalmente para la ejecución de túneles y galerías, lo que constituye su «activo», en el «pasivo», el gel G-3 y las demás inyecciones estructurales de base silicato presentan propiedades que se deberían considerar en los proyectos, y que requieren ulterior investigación, principalmente en el campo de la físico-química y la reología que son: el fenómeno de sinéresis, el fenómeno de fluencia bajo carga («creep») y la estabilidad a largo plazo, química y mecánica.

En este trabajo se presentan los antecedentes de la inyección química de base silicato G-3, se resumen sus principales propiedades y se describen someramente algunas obras realizadas por nosotros con este producto. Asimismo, se describe la inyección expansiva de base silicato «Alsilex», y su comportamiento en obra. Finalmente se dan unas conclusiones y unas posibles líneas de investigación y actuación en el futuro.

(*) Director Técnico de SOIL TESTING ESPAÑOLA, S. A.

ANTECEDENTES

La inyección química G-3 fue utilizada por primera vez en obra en el año 1967, en Milán, por el autor, donde le había delegado la empresa SOIL TESTING SERVICES, Inc. desde Chicago, como ingeniero de inyecciones. Se trataba de encontrar métodos idóneos para la estabilización del suelo aluvional incoherente de Milán, antes de iniciarse la construcción subterránea de la Línea II del Metropolitano. La Línea I se había construido algunos años antes, mediante excavación a cielo abierto, a cuyo período aún le recuerdan los milaneses como el «del terremoto», por los enormes trastornos que originó a la ciudad. El suelo interesado por la construcción del Metro estaba constituido en buena parte por mezclas incoherentes, de arena y grava, en el que, en general, apenas penetraba la lechada de cemento, o de cemento arcilla, por lo que se pensó en la utilización de inyecciones químicas, es decir, de sistemas líquidos susceptibles de gelificar y de dar coherencia a las formaciones granulares. Se decidió estabilizar un volumen de terreno suficiente para la construcción de un túnel de pruebas, de 20 m de longitud, en dos fases, que posteriormente se sometería, una vez perforado, a una prueba de carga concentrada sobre la «bóveda» inyectada.

La inyección química recomendada inicialmente para las pruebas fue un producto comercial, de base silicato sódico («vidrio soluble»), cuyo reactivo consistía en formamida (HCONH_2) (líquido orgánico muy soluble en agua) y en solución diluida de cloruro cálcico, que actúa principalmente de acelerante para controlar el tiempo de gelificación (10). Al mezclarse en un recipiente, mediante un sistema discontinuo, la solución silicato y la solución reactivo, se produce una reacción en la que finalmente se obtiene fundamentalmente un gel duro de ácido silícico. La reacción de la formamida con el silicato sódico disuelto es muy lenta, desprendiéndose amoníaco, pero la del cloruro cálcico es rápida por lo que se obtiene un aumento inmediato de la viscosidad y frecuentemente aparecen flóculos, lo que a veces dificulta la inyección y el control.

Cuando aún no se había ejecutado la inyección del primer tercio del túnel de pruebas, se observó que iba a faltar formamida, producto líquido que se importaba de Alemania y que tardaría en llegar lo bastante como para tener que parar temporalmente la obra. El autor conocía la inyección química de base silicato, que utiliza como reactivo fundamentalmente el ester líquido acetato de etilo (11), que es relativamente poco soluble en agua, de la que se separa fácilmente pero que se fabrica en Italia y que es más económico que la formamida, a igualdad de peso total, si bien a igual peso equivalente el coste es poco diferente.

Ahora bien, dado que el acetato de etilo es totalmente soluble en formamida y ésta es muy soluble en agua, el autor pensó que utilizando la mezcla líquida formamida-acetato de etilo en proporciones adecuadas, se podría obtener un sistema bastante estable en solución acuosa, con el que incluso sería más fácil de controlar el proceso de gelificación, dado que el acetato de etilo reacciona, mediante saponificación, con el silicato sódico, mucho más deprisa que la formamida, por lo que actúa a la vez de acelerante. Por otra parte, se evitaba la adición de cloruro cálcico, que reacciona casi instantáneamente con el silicato sódico, mientras que los reactivos orgánicos citados necesitan bastante más tiempo. Por otra parte, dosificando adecuadamente la relación acetato de etilo/formamida, se puede conseguir a la vez adicionar una cantidad total de reactivo suficiente para que reaccione con todo el silicato sódico presente, así como regular el

tiempo de fraguado. Esto supone una mejora importante de la estabilidad del gel de ácido silícico hidratado en presencia de agua, al evitar la reacción inversa, $\text{gel} \rightleftharpoons \text{sol}$, así como la posible disolución del silicato sódico que hubiera podido quedar sin reaccionar, si no hubiera habido suficiente cantidad de reactivo. Por otra parte, la sustitución de parte de formamida por acetato de etilo, disminuye la producción de amoníaco, que es molesto para los picadores que excavan el túnel, especialmente si no hay buena ventilación.

La idea tuvo éxito y permitió terminar el túnel de pruebas sin paradas y con excelente resultado, por lo que el nuevo reactivo, para el que el autor propuso el nombre de G-3 («Grout 3»), fue adoptado en lo sucesivo en la sección de pruebas, así como posteriormente en varios tramos de la Línea II del Metro de Milán, precisamente en los más críticos, por la existencia de edificios elevados, como fue el caso de la Vía Pirelli.

Posteriormente, se utilizó el G-3 en varias obras en España, en suelos arenosos, con buen resultado, como en la estación Plaza Universidad, del metro de Barcelona (1969); en un tramo de unos 300 m.l., con socavones, del Colector axil del paseo de la Castellana, de Madrid (1970); en el Colector del Abroñigal, bajo la línea del Metro, en Vallecas-Madrid (1971), etc. Poco después el G-3 pasó a los Estados Unidos, donde se ha utilizado en bastantes obras, por ejemplo en algunas secciones del metro de Washington D.C. de Baltimore y de Pittsburg, siendo las inyecciones químicas estructurales de base silicato las más utilizadas en el momento presente (15) (20).

Otro tipo de inyección aplicado a la Ingeniería Geotécnica, por el autor, como se ha dicho, fue la inyección química expansiva, de base silicato, «Alsilex». Este tipo de inyección fue utilizado por primera vez en obra, en el año 1970, durante la construcción del colector axil, bajo nivel freático, del Paseo de la Castellana, de Madrid, en un frente crítico, y al año siguiente en las excavaciones bajo nivel freático, en arena limpia, para una Planta de depuración de aguas residuales en Barcelona. Como se indica más adelante, en la mezcla líquida inicial, todos los componentes del Alsilex son fácilmente solubles en agua, lo que facilita su preparación y control, y son relativamente económicos, pudiéndose regular fácilmente el tiempo de gelificación a tiempos muy cortos. Asimismo, el producto durante la gelificación puede expansionar del orden del cien por cien e incluso más, dando lugar a un gel semiduro (o duro si está muy confinado) de baja densidad.

Como se ha indicado, se ha generalizado el método de autodosificación y bombeo, para este tipo de inyecciones estructurales de base silicato, por el sistema «continuo», que el autor puso a punto en el año 1969 en una obra para el Metro de Barcelona (Estación Plaza Universidad), en la que se inyectaron con este método 9.300 Hl de G-3, para estabilizar el suelo incoherente de una riera subterránea. Este método permite utilizar tiempos de gelificación más cortos que con el método discontinuo, lo que, en general, supone mayor control del gel en el terreno. En el método «continuo» las dos soluciones reaccionantes se bombean separadamente y se mezclan en un tramo al efecto de la tubería, poco antes de penetrar en el taladro (*), mientras que en el método «discontinuo», dichas soluciones se mezclan previamente en un tanque, del que se

(*) Recientemente se ha desarrollado un «método continuo» en el que la solución silicato y la solución reactivo se envían por tubos concéntricos en el terreno y se mezclan a la salida, lo que permite emplear tiempos de gelificación de menos de 1 minuto (13).

bombee la mezcla al taladro, con peligro de que se gelifique en el tanque o en las tuberías. Este método «continuo» ha sido automatizado posteriormente, pudiéndose inyectar controladamente hasta 8 taladros a la vez (15).

La inyección química G-3 ha sido ensayada y estudiada recientemente en la facultad de Ingeniería Civil, sección de Mecánica del Suelo, de Northwestern University, Illinois, bajo la dirección del Prof. R.J. Krizek. Tres de sus trabajos de investigación se han expuesto en el reciente congreso internacional de Nueva Orleans, sobre inyecciones, organizado por la ASCE, y cuyos resultados se han considerado en la exposición que sigue (4, 5, 6). Otro congreso importante sobre este tema, se celebró en Londres, en 1963, «Grouts and drilling muds in Engineering Practice», organizado por la «International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering». Una información suplementaria reciente, sobre la tecnología de las inyecciones químicas y su control, es la contenida en los trabajos de puesta al día e investigación, encargados a expertos, por la «FHWA, U.S. Department of Transportation», entre los años 1976 y 1982 (15 a 19).

PROPIEDADES DE LA INYECCION QUIMICA ESTRUCTURAL DE BASE SILICATO G-3

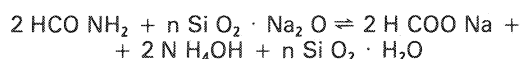
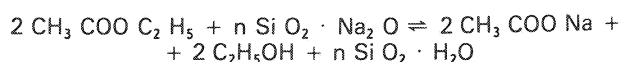
La inyección química G-3, de base silicato sódico ($n\text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{O}$) y reactivo orgánico, recién preparada, es decir una vez mezclado el componente «reactivo» (solución acuosa de acetato de etilo-formamida), con el componente «silicato» (solución acuosa coloidal de vidrio soluble), constituye una mezcla líquida que se comporta como un líquido newtoniano y que en determinadas proporciones es transparente, homogénea y estable, hasta que comienza la gelificación. Las concentraciones usuales, en volumen, de la mezcla líquida total suelen oscilar entre 40 % y 60 % de vidrio soluble (típicamente de 30 a 42 °Bé de densidad), 7 % a 13 % de acetato de etilo-formamida y el resto de agua. La relación $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, del silicato sódico comercial en peso, suele oscilar entre 3,2 y 4,0 y su contenido en SiO_2 entre 23 % y 30 %, precisándose menor cantidad de reactivo para completar la reacción al aumentar dicha relación, es decir, al disminuir el contenido en álcalis. Según la concentración en vidrio soluble, la viscosidad inicial del G-3 varía generalmente entre 5 y 7 cps.

Con la solución G-3 se pueden inyectar suelos arenosos con constantes de permeabilidad comprendidas entre $K \geq 10^{-1}$ cm/s, correspondiente a arenas y mezclas de arena y grava limpias y $K = 10^{-3}$ cm/s, correspondiendo este último valor a arenas finas, con aproximadamente 12 % de fracción limosa (que pasa por el tamiz N.º 200). También se pueden inyectar suelos arenosos con una constante de permeabilidad $K = 10^{-4}$ cm/s, pero muy lentamente (en general menos de 100 l/h de capacidad de bombeo para que se impregne el suelo, sin que se produzca su fractura hidráulica). Asimismo, en general, son inyectables los suelos arenosos cuyo tamaño de grano d_{10} cumple con la condición $0,02 \text{ mm} < d_{10} < 0,5 \text{ mm}$, siendo d_{10} el «tamaño efectivo de Hazen», que indica que el 10 % del peso de los granos del suelo es inferior a dicho tamaño.

Usualmente se emplean tiempos de gelificación en vaso, de unos 10 a 30 minutos, pero que se pueden aumentar a más de 40 minutos, si bien con tiempos largos de gelificación aumenta el riesgo de pérdida de control y de dilución del G-3 en el terreno. Sin embargo, como se indica más adelante, el tiempo de gelificación del G-3 en el

terreno, mientras se sigue bombeando o bajo agitación violenta, es notablemente más largo que el obtenido en condiciones estáticas; en general, es del orden de 5 a 6 veces mayor, e incluso más si se continúa el bombeo, si bien aumenta la viscosidad durante el período de inducción, es decir, antes que se produzca la gelificación.

Las reacciones químicas principales que se producen son las siguientes:



Como puede observarse, en las reacciones anteriores se descompone el silicato sódico, produciéndose un gel de ácido silícico. Sin embargo, a veces no se añade suficiente reactivo para que se complete la reacción, aunque gelifique y endurezca el producto, lo que puede afectar a su estabilidad con el tiempo, especialmente frente a la acción del agua.

En la figura n.º 1 (7), se ha representado la curva «viscosidad en función del tiempo» de una solución de G-3 con 50 % de vidrio soluble (relación $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 3,22$) y 10 % de acetato de etilo-formamida (en relación 1:1 en volumen), y un tiempo de gelificación de 30 min, en vaso.

Posteriormente el gel endurece durante un período de unos 5 días formándose ácido polisilícico, a la vez que se contrae algo y suelta agua, fenómeno característico de los geles de sílice, que se conoce con el nombre de sinéresis, variando a la vez las propiedades del gel.

Sin embargo, como se ha dicho, si no se añade suficiente reactivo no se transforma todo el silicato sódico en ácido silícico. De ahí la importancia de ajustar la proporción formamida: acetato de etilo del reactivo. Así, una proporción en volumen 55 % formamida y 45 % acetato de etilo produce, en general, a igualdad de tiempo de gelificación, geles más resistentes y estables que con la relación 50 % : 50 %, aunque ello supone un gasto mayor de reactivo, si bien la dosificación óptima depende de la concentración en silicato sódico, de su composición, de la del agua del suelo, y del objetivo deseado.

Finalmente el suelo arenoso incoherente se transforma, tras la correcta inyección de G-3 y la conglomeración

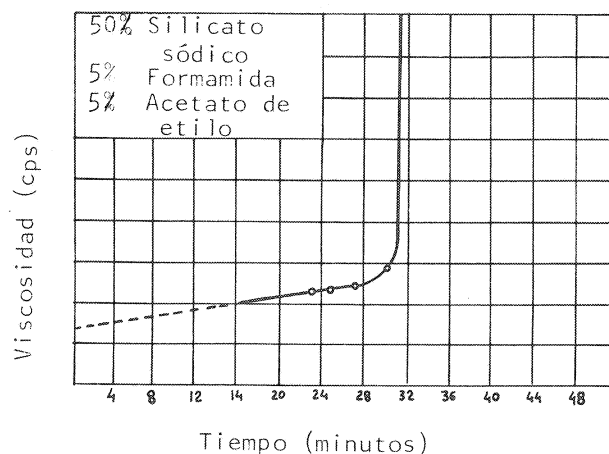


Fig. 1. — Viscosidad en función del tiempo del G-3 (7)

conseguido, en una formación parecida a una arenisca semi-cementada y poco permeable.

En las arenas inyectadas con G-3, el gel actúa como un pegamento muy viscoso, dando cohesión a la masa granular, a la vez que reduce el volumen de los huecos. Para determinar las propiedades in situ de los suelos granulares inyectados, se deberían ensayar en el laboratorio en condiciones análogas de confinamiento (ensayo triaxial), con especial atención al efecto del tiempo, tanto en cuanto a la edad de las muestras, como al gradiente de carga, y a las condiciones de curado.

El coeficiente de permeabilidad inicial de las arenas recién inyectadas con G-3 es aproximadamente 3 a 5 órdenes de magnitud menor que el de la arena original; sin embargo, la permeabilidad aumenta posteriormente con el tiempo, debido al fenómeno de sinéresis. Por otra parte, se ha observado que el efecto de este fenómeno de sinéresis es menor al disminuir el tamaño de grano de la arena, siendo muy reducido en arenas muy finas, en las cuales es también mayor la estabilidad (14,16).

El criterio de rotura de Mohr-Coulomb describe bastante bien el comportamiento mecánico de las arenas inyectadas con G-3 y sometidas a ensayos de compresión triaxial drenados o no drenados. Las curvas envolventes de los círculos de Mohr-Coulomb en rotura, determinadas para tensiones efectivas, dan los mismos resultados de cohesión efectiva y de ángulo de rozamiento interno efectivo, independientemente de las condiciones de drenaje (Fig. n.º 2). Esto indica que se cumple la ecuación fundamental de Terzaghi $\bar{\sigma} = \sigma - u$, donde $\bar{\sigma}$ es la tensión efectiva intergranular, σ es la tensión total y u es la presión intersticial. La tensión efectiva, es decir intergranular, controla la resistencia y las deformaciones de la estructura del suelo.

Se ha determinado experimentalmente que la impregnación con geles duros de base silicato apenas tiene efecto sobre el ángulo de rozamiento interno de las arenas, en ensayos de carga muy lentos, si bien le aumenta para períodos de carga cortos (21), probablemente por aumento de la resistencia debida a dilatación.

Las deformaciones axiales en rotura, de las arenas inyectadas, en ensayos de compresión no confinada, después de un período de curado de 5 días, son generalmente inferiores al 1 %, tanto para las arenas compactadas como flojas, siendo la rotura frágil. Las arenas inyectadas se comportan reológicamente como un sólido viscoelástico, de rigidez elevada, en el que el fenómeno de fluencia bajo carga es fundamental.

Es decir, las propiedades de las arenas inyectadas con geles duros de base silicato, dependen del factor tiempo, cuando se las somete a la acción de cargas sostenidas.

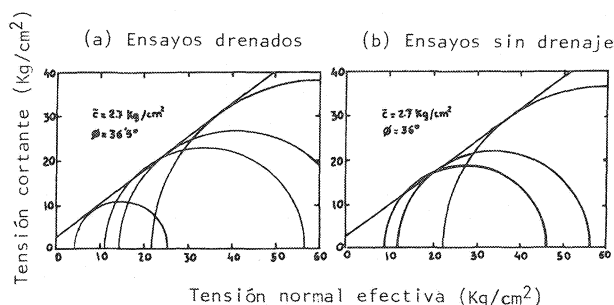


Fig. 2. —Envolventes en rotura de las curvas de Mohr-Coulomb en arenas inyectadas con G-3, para tensiones efectivas (5).

La información de que se dispone muestra que las probetas de arena inyectada, sometidas sin confinamiento a cargas axiales, pueden romper al cabo de aproximadamente una semana, con una carga del 30 % al 50 %, de la que se hubiera obtenido en un ensayo de compresión no confinado rápido. Este fenómeno de fluencia es menor en condiciones de carga confinada, que, en general, son las situaciones reales en el terreno; por ello, se deberá considerar esta característica con especial cuidado en los proyectos en los que una formación granular inyectada vaya a estar sometida a cargas continuadas durante cierto tiempo. Esto tiene especial importancia cuando no hay soporte en una de las caras, por ejemplo en la apertura de túneles o de excavaciones a cielo abierto (recintos, zanjas, pozos), frecuentemente bajo nivel freático, que posteriormente, una vez excavados se suelen reforzar con bóvedas, muros u otras estructuras, principalmente de hormigón armado.

Se ha observado (21) la existencia de dos picos de tensión, en las arenas inyectadas con geles duros de silicato, sometidas a ensayos de compresión triaxial, muy lentos, hasta deformaciones superiores al 10 %. El primer pico se produce para deformaciones muy pequeñas, mientras que el segundo se produce para deformaciones relativamente grandes. Se puede atribuir el primer pico a las propiedades viscosas del gel intergranular, que soporta al principio la mayor parte de la carga; sin embargo, para deformaciones mayores la carga es compartida conjuntamente por el gel y por los granos de arena.

La resistencia a compresión no confinada, rápida, de probetas de arena inyectadas con G-3, empleando como reactivo 10 % de acetato de etilo-formamida en relación 1:1 en volumen y vidrio soluble de relación ponderal $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 3,22$ ($D = 1,38$; $\text{SiO}_2 = 28,7 \%$) y curadas durante un mes, en cámara húmeda y en agua, figuran en la tabla n.º 1 (4).

TABLA N.º 1
Resistencia media a compresión no confinada de muestras de arena compacta inyectada con G-3, en ensayos de carga rápida

	(a) 40 % de vidrio soluble kg/cm²	(b) 50 % de vidrio soluble kg/cm²	(c) 60 % de vidrio soluble kg/cm²
Curado en cámara húmeda	3	8 — 10	22 — 28
Curado en agua	3	8 — 10	15 — 17 (*)

En el ensayo de resistencia a la compresión no confinada, con cargas sostenidas largo tiempo, el máximo nivel de tensión axial relativa (respecto del valor obtenido en un ensayo rápido) que resistieron durante 1 semana, las probetas curadas en aire húmedo, fue aproximadamente el 50 %, mientras que con el 40 % rompieron, en general, entre 1 semana y 2 meses. Algo semejante sucedió a las

(*) Este resultado anormalmente bajo de resistencia puede explicarse por falta de reactivo, que en este caso debiera haber sido del orden del 12 % (posiblemente 7 % formamida + 5 % acetato de etilo) para obtener mayor resistencia y estabilidad. Consideramos quedó un exceso de silicato sódico, del orden del 25 %, sin reaccionar totalmente, que fue afectado posteriormente por el agua en exceso. Sin embargo, en las mezclas ensayadas (b) con 50 % de vidrio soluble el reactivo empleado fue capaz de reaccionar aproximadamente con el 90 % o más del silicato sódico, obteniéndose un gel mucho más estable frente al agua.

probetas curadas en agua, que habían sido inyectadas con G-3 dosificado con 40 % y 50 % de vidrio soluble.

En todo caso, para un tiempo en carga del suelo inyectado de pocas semanas, en los proyectos no se debería adoptar un valor de la cohesión para esas condiciones superior a $0,40 C$, siendo C el valor de la cohesión obtenida en un ensayo triaxial rápido (4). Asimismo, se debería ensayar previamente la cantidad de reactivo necesario, para que no quede apenas silicato sódico sin reaccionar por completo, especialmente en obras bajo nivel freático.

Según esto, para una arena saturada (o sin saturar) inyectada con G-3, la expresión de la resistencia al corte en dichas condiciones, con movilización del rozamiento interno, en un análisis de estabilidad según el criterio de rotura de Mohr-Coulomb, vendría dada por la expresión:

$$\tau_f = 0,40 C + \bar{\sigma}_n \operatorname{tg} \varnothing \quad (4)$$

donde:

τ_f = Resistencia al corte en rotura (dependiente del tiempo).

C = Cohesión, igual a la ordenada en el origen de la curva experimental de resistencia al corte de un ensayo triaxial rápido (dependiente del tiempo).

$\bar{\sigma}_n$ = Tensión efectiva normal al plano de rotura.

\varnothing = Ángulo de rozamiento interno.

El valor obtenido para C en arenas flojas inyectadas con G-3, dosificado con 50 % de silicato sódico, es del orden de $2,0 \text{ kg/cm}^2$, y de $5,0 \text{ kg/cm}^2$ para una dosificación con 60 % de silicato sódico y suficiente reactivo para que reaccione prácticamente todo el silicato. El valor de C varía relativamente poco con la compactación de la arena, si bien aumenta con su finura y superficie específica y disminuye con el tiempo de mantenimiento de la carga.

Las características de resistencia a corto plazo del suelo granular inyectado se representan en la figura n.º 3.

En la figura n.º 3, C es la cohesión inducida por el gel y \varnothing es el ángulo de rozamiento interno, que incluye la componente debida a rozamiento entre superficies y la

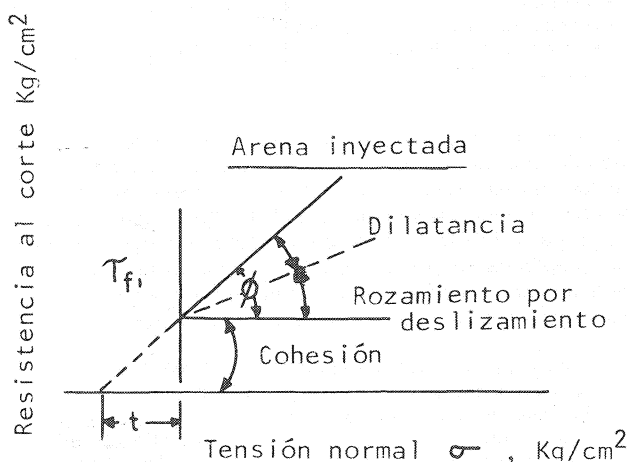


Fig. 3.—Resistencia al corte en rotura de arena inyectada, en función de la tensión efectiva normal (15).

componente de dilatancia, debida a la imbricación de los granos de arena, que es tanto mayor cuanto más compacta es la arena. La dilatancia representa el trabajo que hay que realizar contra la tensión normal $\bar{\sigma}$. El llenado de los poros por el gel puede influir sobre la dilatancia, aumentándola, al menos a corto plazo. De la figura n.º 3 se deduce que mientras la resistencia debida al rozamiento es proporcional a la tensión normal (*), la resistencia debida a la cohesión es independiente de dicha tensión.

Inyección de suelos arenosos con G-3

La penetración de la inyección de G-3 en suelos arenosos, por impregnación, es decir sin que se produzca rotura hidráulica del suelo, sigue prácticamente la ley de Darcy, para el flujo de un líquido en un medio poroso:

$$v = K \cdot i$$

v = Velocidad de flujo

K = Constante de permeabilidad

i = gradiente hidráulico $\left(\frac{\Delta p}{l}\right)$

En la práctica, el caudal de bombeo de G-3 en cada tramo de inyección suele variar entre 2 y 20 litros/min. Caudales inferiores a 1 litro/min no son, en general, prácticos, aun inyectando varios taladros a la vez, y caudales puntuales superiores a 40 litros/min son difíciles de controlar e indican que posiblemente se hubiera podido inyectar previamente cemento o arcilla-cemento.

Como se ha indicado, el caudal de inyección aumenta proporcionalmente a la presión de inyección, hasta llegar al punto en que se produce la rotura hidráulica del suelo, es decir, que se produce un aumento desproporcionado del caudal, perdiéndose el control de la inyección.

El espaciado entre taladros suele estar comprendido, en general, entre 0,8 y 1,5 m, ejecutándose la inyección, según los casos, en dos o incluso en 3 fases, de perforación de taladros e inyección en puntos intermedios, para asegurarse de que la inyección del suelo ha sido correcta (7). En estas condiciones, la eficacia del llenado de los poros del suelo suele estar comprendida entre el 60 % y el 90 %. La porosidad de los suelos inyectables suele variar entre 25 % para arenas algo limosas, muy compactas, y 50 % para arenas bastante uniformes, muy flojas.

De las experiencias realizadas en el laboratorio (6) en modelos lineales, cilíndricos y esféricos, se deduce que el G-3, inyectado correctamente en suelos arenosos, saturados o no saturados, en general, avanza impregnando el suelo, de forma que la solución más reciente desplaza hacia el exterior de la formación granular a la inyectada poco antes.

Por otra parte, el tiempo de gelificación real, es decir en el subsuelo, debe ser suficiente para que la solución inyectada alcance el radio mínimo previsto de terreno, sin necesidad de tener que subir la presión de bombeo por encima del valor prefijado.

(*) Esta ley macrofísica, descubierta por Leonardo da Vinci, y más tarde por Amontons es la más importante de la geotecnia; Terzaghi fue quizás el primero en tratar de interpretarla a partir de la naturaleza físico-química de los cuerpos en contacto.

Se ha observado que la resistencia del gel, en suelos saturados, disminuye, en general, con la distancia al punto de inyección, especialmente en los bordes de la zona inyectada, seguramente por el efecto de dilución con el agua del subsuelo.

La comprobación del efecto de la inyección en suelos granulares se puede hacer mediante ensayos in situ tales como: Medidas de permeabilidad, resistencia a la penetración estándar «SPT», ensayos presiométricos, ensayos penetrométricos y toma de muestras inalteradas. Estas comprobaciones son, en general, delicadas, dado que es fácil perturbar el gel intergranular y que a cierta profundidad la resistencia del gel es una fracción de la resistencia global; por ello se está investigando actualmente el empleo de técnicas no destructivas, tales como la emisión radar y la emisión acústica, entre taladros (17).

Así, se ha observado que la velocidad acústica suele aumentar de 2 a 5 veces en suelos arenosos inyectados, con geles de silicato de media resistencia; por el contrario, estos suelos inyectados son prácticamente opacos a las ondas radar, mientras que no lo son los suelos granulares no inyectados. Asimismo, puede ser de utilidad el empleo de geofonos colocados dentro de taladros próximos al de inyección, para determinar la presión de inyección a la que se produce la rotura hidráulica del suelo.

Prueba a escala real de estabilización de suelo granular mediante inyección química G-3 para la Línea II del Metro de Milán (1967-1968)

Previamente a la construcción subterránea de la Línea II del Metro de Milán, en gran parte constituido por suelo granular incoherente (arena y grava), se procedió, según se ha indicado anteriormente, a la ejecución de un túnel de pruebas, en dos tramos continuos, de 10 m de longitud cada uno, estabilizando el terreno con inyecciones químicas estructurales, de base silicato.

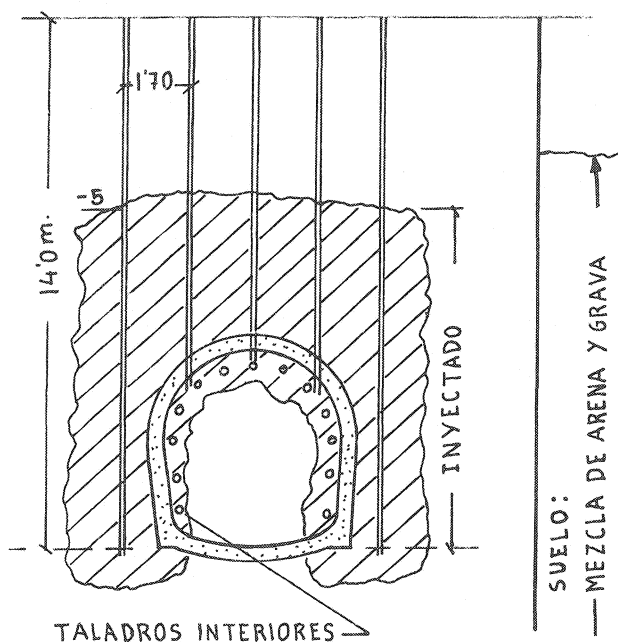


Fig. 4.—Disposición de taladros en una sección transversal del túnel de pruebas inyectado con G-3 (Milán).

La granulometría media de varias muestras del suelo granular inyectado fue la siguiente:

Tamiz, mm	150	100	30	4	0,105	0,075 (#200)
% que pasa:	100	99	85	45	3	2

Tras la estabilización del primer tramo del túnel, primeramente con un producto comercial y después con G-3, según se ha referido, se decidió estabilizar el segundo tramo totalmente con G-3. Este tramo, una vez excavado, sería sometido a una prueba de carga, que simularía el efecto de una zapata de un edificio.

La inyección de este segundo tramo, al que nos referimos únicamente en lo que sigue, se realizó desde fuera del túnel, mediante taladros verticales, y desde dentro del túnel, mediante taladros inclinados. En la figura n.º 5 se ha representado una sección transversal del túnel, en la que figura la disposición de las perforaciones. Los taladros verticales se perforaron con una sonda Atlas-Copco, con tubería de acero que permite dejar en su interior, al extraerla, un tubo de plástico ranurado a distintas alturas, con manguitos de goma, que se sella después al terreno. Los taladros inclinados se ejecutaron desde el interior del túnel con una sonda ligera a rotación, con corona de 1,5 pulgadas, inyectándose el terreno por fases descendentes.

Para la inyección se emplearon dos formulaciones de G-3 que figuran en la tabla n.º 2.

TABLA N.º 2
Formulaciones de G-3 empleadas en la inyección del segundo tramo del túnel de pruebas

	Formulación «A» (% en volumen)	Formulación «B» (% en volumen)
Silicato sódico (40-41° Bé) ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 3,2-3,3$) ($D = 1,39$) ($\text{SiO}_2 = 29\%$; $\text{Na}_2\text{O} = 9,0\%$)	55,0	53
Agua	36,0	38,5
Formamida ($D = 1,14$)	5,8	4,25
Acetato de etilo ($D = 0,901$)	3,2	4,25
	100,0	100,0
Tiempo de gelificación	30-35 min	23-27 min
Viscosidad aparente en cono Marsh (1.000 cm^3)	45 seg.	42,5 seg.
Temperatura	19-20 °C	19-20 °C
Resistencia del gel al penetrómetro de mano, a los 5 días	> 5 kg/cm^2	> 5 kg/cm^2

La dosificación y el mezclado se realizaron mediante el método «discontinuo», es decir, se hacían mezclas individuales en una mezcladora de 2 alturas, o sea, mientras se bombeaba la mezcla ya preparada de la altura inferior se estaba preparando otra mezcla en la altura superior, que una vez preparada se pasaba al inferior para su bombeo. Las características medias de la operación de inyección del tramo de 10 m de longitud, fueron las siguientes:

— Volumen total de G-3 inyectado	: 2.000 HI
— Número de taladros	: 36
— Volumen de G-3 inyectado por m.l. de taladro	: 400 a 600 litros
— Caudal de inyección	: 8 a 12 litros/min
— Presión de inyección	: 0,5 a 2,0 kg/cm^2
— Volumen de poros rellenado por la inyección	: 70 a 80 %

La excavación del túnel de pruebas se realizó satisfactoriamente, empleándose martillos neumáticos en las zonas inyectadas. Se tomaron muestras inalteradas del suelo inyectado, cuya resistencia a la compresión no confinada rápida varió entre 8 y 14 kg/cm².

Para la ejecución de la prueba de carga, que se realizó a las dos semanas de terminada la inyección, se excavó en superficie un pozo de 2,3 m × 2,3 m de lado, hasta una profundidad de unos 5 m, es decir, hasta una distancia de unos 3 m de la clave del túnel. Se instalaron 6 puntos fijos de referencia en la sección transversal central, anclados en el suelo inyectado. El pozo se hormigonó y recreció, constituyendo una columna de 80 t de peso, sobre la que se cargaron perfiles de acero hasta un peso total de 160 t, lo que supone una carga unitaria media en la base de 3,0 kg/cm². Las deformaciones verticales obtenidas en la prueba de carga fueron inferiores a 2 mm, lo que indica que el suelo inyectado con G-3 se comportó con una rigidez elevada y la prueba fue considerada satisfactoria.

Inyección química expansiva de base silicato «Alsilex»

La inyección química expansiva de base silicato sódico «Alsilex» fue ideada con objeto de conseguir una solución líquida para la estabilización de suelos granulares y con tiempo de gelificación corto y controlable, en la que todos los componentes fueran totalmente solubles en agua y relativamente económicos. Por otra parte, un producto expansivo puede ser muy adecuado para rellenar y sellar, no sólo poros del terreno, sino también oquedades y cavernas con un producto semiduro y ligero.

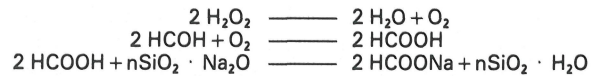
Estas propiedades las tiene el producto «Alsilex», en el cual la «solución reactivo» está compuesta por una solución acuosa de formaldehído (HCOH), y la «solución base» por una solución acuosa de silicato sódico y de agua oxigenada. Si se desea aumentar la resistencia o la estabilidad del gel, se puede añadir también formamida y un ester a la solución de formaldehído (3).

Al ponerse en contacto las dos soluciones, el agua oxigenada oxida al formaldehído que pasa a «ácido fórmico», el cual reacciona inmediatamente con el silicato sódico formándose un gel de ácido silícico hidratado. La primera reacción es bastante exotérmica, lo que autoacelera la reacción y se produce también la descomposición parcial del agua oxigenada, desprendiéndose oxígeno en forma de burbujas gaseosas. Este gas queda a su vez atrapado por el gel en formación, que hincha, produciéndose un aumento de volumen de la masa gelatinosa, que puede ser del doble del volumen líquido original, e incluso superior. Finalmente, se obtiene un gel semi-duro, de baja densidad y estructura celular.

Sin embargo, si la expansión de la inyección está impedida por el confinamiento, por ejemplo en huecos o poros grandes, en materiales no muy permeables, el resultado es un gel duro. A la vez se produce el apretamiento del suelo granular periférico flojo, lo que supone un aumento del rozamiento interno y de su resistencia intrínseca. La presión interna y el volumen de la masa gelatinosa reciente disminuye al terminar el proceso de oxidación y enfriarse el gel, si bien este fenómeno es probablemente menos importante en el subsuelo, dado que el aumento de temperatura es menor por la transmisión rápida del calor al terreno húmedo o saturado. Por último cesa totalmente la presión interna y la expansión.

Por otra parte, es un hecho general que el resultado de las inyecciones químicas suele ser bastante mejor in situ, es decir en el terreno correctamente inyectado, que en el laboratorio, debido a lo difícil de reproducir en éste las condiciones de confinamiento del terreno, por lo que los ensayos más adecuados de laboratorio son los triaxiales.

Las reacciones principales son las siguientes:



Para obtener un gel prácticamente insoluble y estable se debe emplear suficiente cantidad de «reactivo», es decir, de formol y de agua oxigenada.

Los productos químicos utilizados como «reactivo» en el Alsilex, además de ser totalmente solubles en agua, son bastante más económicos que los esteres y amidas utilizados normalmente en las inyecciones químicas estructurales de base silicato sódico. Por otra parte, el peso molecular del formol (P.M. = 30) y el peso químico equivalente, son inferiores al de dichos compuestos químicos, lo que significa una mayor actividad e igualdad de peso total.

La primera obra en la que se empleó esta inyección química expansiva fue en el colector axil del paseo de la Castellana, de Madrid, en el año 1970. En el curso de las obras de excavación del colector, de unos 3,25 × 4 m de sección, situado a unos 20 m de profundidad y unos 10 m bajo nivel freático, durante el avance de la excavación, sin



Fig. 5.—Oquedades y grietas del suelo granular del Colector de la Castellana de Madrid, rellenas con la inyección química expansiva Alsilex de base silicato.

estabilización química, se había producido en un frente el desplome de la bóveda, con abundante arrastre de suelo incoherente, arenoso, por el agua. Para la reparación, se tapó el frente de la galería con un muro de ladrillo de 2 pies, se rellenó por detrás lo que se pudo, con arena, y se inyectó con Alsilex (de 50 % de silicato sódico comercial) y de 4 minutos de tiempo de gelificación y potencial expansivo algo superior al 100 %. A través de 3 taladros que atravesaban el muro y que penetraban en el terreno, se inyectó un total de 5.000 litros de Alsilex, medidos en bomba, con caudal medio de 25 litros/min. Al cabo de dos semanas se rompió el muro de ladrillo y se inició la excavación, no advirtiéndose olores o picores debidos a la inyección. El terreno estaba duro y totalmente seco, donde antes manaba gran cantidad de agua. Incluso aparecieron grandes oquedades totalmente rellenas de gel duro, con una resistencia a la compresión no confinada superior a 3 kg/cm² al penetrómetro de mano. En la figura n.º 5 puede apreciarse el suelo inyectado y las oquedades totalmente rellenas y selladas por el gel. Dichas oquedades, e incluso cavernas, se hubieran podido rellenar, en principio, con inyección de lechada de cemento o de bentonita-cemento e incluso bombeando mortero. Sin embargo, la inyección de Alsilex, con una resistencia no muy superior a la del terreno, supuso una consistencia adecuada para la excavación posterior de la galería y un peso ligero sobre la bóveda. Asimismo, el Alsilex, con tiempo corto de gelificación, es más fácil de situar y controlar en el terreno perturbado, que por ejemplo la lechada de cemento, que puede desplazarse muy lejos de la zona a estabilizar.

Estabilización de suelo arenoso, bajo nivel freático, mediante inyección expansiva de Alsilex, para una planta de depuración de agua en Barcelona (1971)

Para la construcción de una planta de depuración de aguas residuales de Barcelona, situada cerca del mar, se requería excavar 6 recintos, bajo nivel freático, en arena limpia, debiendo quedar las paredes prácticamente verticales y estables. Seguidamente se construiría en su interior tanques abiertos de hormigón armado. La profundidad de las excavaciones fue de 2,5 m (2,3 m bajo nivel freático) en 4 recintos y de 3,8 m (3,6 m bajo nivel freático) en 2 recintos. La longitud total del perímetro de los 6 recintos fue de unos 350 m, siendo la planta de los 2 recintos más profundos de 26 m x 7 m.

El subsuelo, salvo los 2 primeros metros que eran de relleno y se desmontarían más adelante consistió fundamentalmente en arena media-gruesa, limpia, semicompacta, que se extendió hasta una profundidad superior, en general, a 14 m, si bien en alguna ocasión aparecieron lentejones de limo-arenoso hacia los 10 m de profundidad. La resistencia media a la penetración SPT de la arena fue de 20 a 30 golpes/30 cm y el coeficiente de permeabilidad de 2×10^{-2} a 8×10^{-2} cm/sg.

Para la estabilización previa a la excavación del subsuelo granular se prefirió la inyección química de Alsilex a la hincada de tablestacas o a la pantalla continua de hormigón (excavada con lodo bentonítico), en lo que influyó la elevada situación del nivel freático y el gran espesor del manto arenoso existente, muy permeable, y por tanto la dificultad de alcanzar un fondo poco permeable, y por tanto la dificultad de alcanzar un fondo poco permeable con tablestacas o pantallas. La inyección de Alsilex no sólo debería dar temporalmente a la arena periférica y del fondo

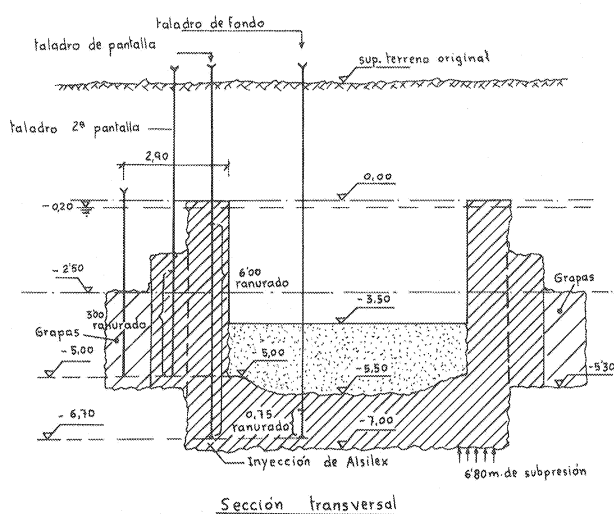


Fig. 6.—Sección transversal de un recinto de 3,8 m de profundidad y disposición de taladros laterales de inyección (Barcelona).

de los recintos una cohesión y un peso suficiente para resistir el empuje del agua y del propio suelo, sino también una impermeabilidad suficiente para evitar arrastres y sifonamientos y poder ejecutar la obra, manteniendo un achique reducido. Por otra parte, el Alsilex produce un gel semiduro que permitió excavar las arenas inyectadas, desde fuera de los recintos, con retro-excavadora.

La obra de estabilización consistió en la inyección de un fondo en cada recinto de 1,5 m de espesor y de una pantalla periférica, con un espesor de unos 2,0 m, que se aumentó a un espesor de unos 2,5 m en los 2 recintos de mayor profundidad. Esta inyección periférica se extendió hasta la cota de la base del fondo inyectado de los recintos (Fig. 6).

Dadas las características de este gel altamente expansivo, que continúa penetrando en los poros del suelo granular incluso después de dejar de bombear, la inyección del terreno se realizó a través de tubos de plástico ranurados, sellándose la parte superior del taladro con mortero de cemento. El espaciado entre taladros equipados fue de 1,0 m en pantallas y de 1,5 m en fondos.

Dado que el Alsilex expansiona a un volumen del orden del doble del volumen inicial, se decidió utilizar un volumen líquido, es decir medido en bomba, del orden del 50 % del volumen de poros del suelo, es decir unos 170 litros por m³ de suelo. El tiempo de gelificación medio «de control» adoptado fue de 8 min. La inyección se realizó manteniendo una cobertura de tierras existentes de unos 3 a 4 m de espesor, que fue desmontada posteriormente antes de ejecutar la excavación de los recintos. Se utilizó el método continuo de bombeo, mediante una bomba única de doble pistón, que bombea separadamente las dos soluciones reaccionantes, a la vez que las dosifica. El volumen total de inyección química empleado fue del orden de 10.000 HI.

La dosificación global empleada de Alsilex, en volumen, para un tiempo de gelificación de control de unos 8 min, fue la siguiente:

- Silicato sódico ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}=3,9$) de 31-32 Bé = 50%
($D=1,29$; $\text{SiO}_2=24,4\%$; $\text{Na}_2\text{O}=6,25\%$)
 - Agua oxigenada (30%) de 110 vol. = 3-4%
 - Formaldehído (40%) = 5-6%
 - Agua = 40-42%
- La viscosidad inicial de la mezcla fue del orden de 5 cp.

El caudal medio de inyección fue de unos 15 lit/min por cada m.l. de tubo ranurado, con una presión de 0,5 a 1,5 kg/cm². Al terminar la inyección de los taladros subía la presión, y al quitar la manguera se ponía inmediatamente un tapón en la cabeza de los tubos de plástico ranurados, colocados en el terreno, para que no se saliera el producto inyectado, por la presión inducida por él mismo, al expansionar durante la gelificación. Creemos que esta presión interna, puntual y progresiva, debe ayudar a rellenar con gel más completamente los poros del suelo y ampliar el radio de acción de la inyección, de una forma más isotrópica y uniforme. Al mismo tiempo la contrapresión desarrollada en el terreno sirve, al inyectorista, para controlar la operación de inyección.

Con el método de inyección empleado se pudieron alcanzar caudales en bomba de hasta 75 litros/min sin que la presión en cabeza de taladro pasara de 1,5 kg/cm² y sin que se produjera en ningún caso la rotura hidráulica del suelo.

Una vez ejecutada la inyección del terreno arenoso, se observó que el radio medio inyectado había sido de unos 0,75 m, si bien en ocasiones llegó a 1,0 m. La resistencia media a compresión no confinada del suelo inyectado, con el gradiente de carga usual fue de 1,5 a 3,0 kg/cm², disminuyendo la resistencia, en general, con la distancia al punto de descarga de la inyección, y aumentando con el grado de confinamiento.

La permeabilidad media inicial de la arena inyectada in situ fue del orden de $K = 10^{-5}$ cm/seg. La resistencia a la penetración SPT de la arena inyectada fue de 45 a 60 golpes/30 cm, lo que indica que el tratamiento de inyección aumentó dicha resistencia aproximadamente al doble.

Durante la excavación de los recintos inyectados, se observó que el comportamiento del terreno fue el proyectado; es decir, el vaciado se realizó desde fuera, normalmente, con una retro-excavadora de orugas, diferenciándose claramente la resistencia a la excavación de la arena sin inyectar de la arena inyectada. Los paramentos se mantenían verticales, prácticamente secos y la afluencia de agua al fondo del recinto era reducida, pudiéndose achicar con una bomba de capacidad media, de forma discontinua, situada en el punto más bajo de la excavación (Figura 7). Tampoco se observó que se hubiera formado ningún lentejón o veta de gel, lo que hubiera indicado que se había levantado el terreno o que se había producido la rotura hidráulica del suelo.

Sin embargo, en los primeros recintos, que fueron los de menor profundidad, al cabo de varios días de estar abiertos (algún recinto estuvo abierto, sin protección, cerca de 1 mes), comenzaron a producirse algunas venas de agua, e incluso sifonamientos, en las paredes, así como algunos desconchones, que fueron reparados y sellados, principalmente mediante inyección de G-3, con tiempo de gelificación de unos 2 minutos.

Estos problemas fueron mucho menores en los dos últimos recintos, precisamente los más profundos, debido a que se aceleraron los trabajos de hormigonado y se entibaron ligeramente los paramentos como seguridad. Asimismo, estaban inyectados lateralmente estos recintos en un espesor algo mayor, lo que mejoró el sellado frente al paso del agua, que constituyó el mayor peligro, dado que no se presentaron problemas estructurales de estabilidad general.



Fig. 7.—Paramentos de la excavación en arena inyectada con Alsilex, de un recinto bajo nivel freático, cerca de la playa (Barcelona).

La causa principal de los flujos de agua y sifonamientos diferidos, fue la existencia de algunas bolsadas de suelo insuficientemente inyectadas y la acción del tiempo sobre la estabilidad de la arena inyectada, sometida a esfuerzos cortantes y a un gradiente hidráulico continuados, siendo éste especialmente intenso en dichas bolsadas, al disminuir el espesor de suelo inyectado.

Estas deficiencias se pueden resolver pasando agua después de la inyección de un volumen determinado de Alsilex, para dejar limpio el taladro. Después, al cabo de 4 o más días cuando se ha producido el fenómeno de sinéresis y se ha enfriado el gel, se reinyecta el suelo, a baja presión, bien con el mismo gel, bien con otro de menor viscosidad, por ejemplo con silicato-aluminato de 3 cps, o con acrilamidas con una viscosidad de 1,5 cp, según el grado de impermeabilidad que se desee obtener.

CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

- Este trabajo muestra la utilidad en la Ingeniería Geotécnica de las inyecciones químicas estructurales, de base silicato, correctamente dosificadas y ejecutadas, para la estabilización temporal, conglomeración e impermeabilización parcial de suelos granulares incoherentes, incluso bajo nivel freático, debiéndose conocer sus propiedades y limitaciones.
- Se debería investigar más a fondo sobre esta tecnología de estabilización de suelos, de manera particular en sus aspectos físico-químicos y reológicos, incluyendo la

estabilidad de los geles y formaciones inyectadas, en función del tiempo y de las condiciones del medio, especialmente su solubilidad en agua y su resistencia mecánica en condiciones de carga sostenida.

- Consideramos que las propiedades específicas de los nuevos geles expansivos, de base silicato, pueden tener notable valor práctico, y deberían ser estudiados más exhaustivamente, especialmente en condiciones confinadas y sumergidas, en el laboratorio y en obra. Este tipo de inyección puede ser complementado, en determinados casos, con otra fase diferida de inyección del mismo producto, o de otro de menor viscosidad.
- Para la estabilización e impermeabilización de suelos granulares, con carácter permanente, lo que tiene gran importancia práctica, consideramos puede tener buenas posibilidades el método continuo de dosificación y bombeo, a través de tubos concéntricos, en el que la solución diluida de silicato sódico y la de reactivo se mezclen a la salida, en el extremo del tubo de inyección, pudiendo actuar el propio gel de «obturador químico». Esto permitiría emplear tiempos de gelificación muy cortos y usar, además de reactivos orgánicos, soluciones de compuestos inorgánicos, más económicas y no tóxicas, que podrían formar silicatos hidratados prácticamente insolubles en agua, de alta estabilidad.

REFERENCIAS

- (1) Grouting composition and Method: A. López Ruiz
Italia N.º 833.572 (1968)
España N.º 352.307 (1969)
Francia N.º 1.583.553 (1969)
U.S. patent N.º 3.883.360 (May. 1975)
- (2) Composición y método para la estabilización de suelos y relleno e impermeabilización de huecos mediante un gel expansivo. A. López Ruiz.
Patente española de invención N.º 382.372 (1970).
- (3) Composición y método para la estabilización e impermeabilización de suelos mediante la inyección de disoluciones acuosas que producen geles expansivos. A. López Ruiz.
Patente española de invención N.º 388.322 (1971).
- (4) Creep behavior of silicate grouted sand.
Roy H. Borden, Raymond J. Krizek and Wallace Hayward Baker.
ASCE Specialty Conference on Grouting in Geotechnical Engineering.
New Orleans. February 1982. pp. 450-469.
- (5) Effective stress-strain behavior of silicate-grouted sand.
Raymond J. Krizek, M. Adel Benitayf and Dimitrios K. Atmatzidis.
ASCE Specialty Conference on Grouting in Geotechnical Engineering.
New Orleans. February 1982. pp. 482-497.
- (6) Injection and distribution of silicate grout in sand.
Talat A. Bader, Raymond J. Krizek and Wallace Hayward Baker.
ASCE Specialty Conference on Grouting in Geotechnical Engineering.
New Orleans. February 1982. pp. 540-563.
- (7) Planning and performing structural chemical grouting.
Wallace Hayward Baker.
ASCE Specialty Conference on Grouting in Geotechnical Engineering.
New Orleans. February 1982. pp. 515-539.
- (8) Soil stabilization by grouting on Baltimore subway.
Edward J. Zeigler and John L. Wirth.
ASCE Specialty Conference on Grouting in Geotechnical Engineering.
New Orleans. February 1982. pp. 576-590.
- (9) Use of Grouting in Caisson Construction.
Clyde N. Baker, Jr., Francisco A. Echevarría and John P. Gnaedinger.
ASCE Specialty Conference on Grouting in Geotechnical Engineering.
New Orleans. February 1982. pp. 874-891.
- (10) Chemical composition and process for soil stabilization.
Cletus E. Peeler. U.S. patent 2,968,572 (Jan. 17, 1961).
- (11) Method and composition for strengthening loose grounds.
Claude Caron; France (Application France, 1957).
U.S. patent 3,012,405 (Dec. 12, 1961).
- (12) Grouting System. J.P. Gnaedinger and A. López Ruiz;
U.S. patent 3,518,834 (July, 1970).
- (13) A new grouting material of non-alkaline silica sol.
Masaru Hoshiya, Shunsuke Shimada, Hitaka Kanematu and Kenji Kayahara.
ASCE Specialty Conference on Grouting in Geotechnical Engineering.
New Orleans. February, 1982. pp. 378-393.
- (14) «The state of grouting in the 1980's».
Claude Caron. ASCE Specialty Conference on Grouting in Geotechnical Engineering. New Orleans. February 1982; pp. 346-358.
- (15) «Grouting in Soils», Report N.º FHWA/R.D. 76-76-27, Vol. I and II, for U.S. Dept. of Transportation, June, 1976; by Herndon J., and Lenahan T.
- (16) «Chemical Grouts For Soils», Vol. I and II, Report N.º FHWA/RD-77-50 y RD-77-60, for U.S. Dept of Transportation, June 1977, by Tallard, G.R., and Caron, C. Vol. I: Available materials. Vol. II: Engineering evaluation of available materials.
- (17) «Construction Control», Vol. I of «Improved Design and Control of Chemical Grouting», Report N.º FHWA/RD-82-036, for U.S. Dept. of Transportation, February 1982; by Huck, P.J., Waller, M.J., and Fowler, J.
- (18) «Materials Description Concepts», Vol. II of «Improved Design and Control of Chemical Grouting», Report N.º FHWA/RD 82-037, for U.S. Dept. of Transportation, February 1982; by Krizek, R.J., and Baker, W.H.
- (19) «Engineering Practice of Chemical Grouting», Vol. III of «Improved Design and Control of Chemical Grouting», Report N.º FHWA/RD-82-038, for U.S. Dept. of Transportation, February, 1982; by Baker, W.H.
- (20) «Chemical grouts and their properties» - R.H. Karol.
ASCE Specialty Conference on Grouting in Geotechnical Engineering; New Orleans, February 1982, pp. 359-377.
- (21) «Mechanical behavior of silicate-grouted soils. Birgit U. Stetzler.
ASCE Specialty Conference on Grouting in Geotechnical Engineering; New Orleans, February 1982; pp. 498-514.
- (22) «Las cimentaciones actuales de los rascacielos de Chicago».
Alvaro López Ruiz.
Revista Informes de la Construcción (España). N.º 240, mayo, 1972.